
안정성과 투명성을 고려한 촉감기반 네트워크 가상환경

Networked Haptic Virtual Environments Based on Stability and Transparency ↓

이석희, Seokhee Lee*, 김종원, JongWon Kim**

↓

요약 ~ 본 논문은 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경 시스템의 안정성을 평가하고, 네트워크 지연에 따른 촉감의 질적 저하 정도를 분석한다. 이를 통해서 안정성과 투명성을 위한 올바른 통신 구조를 도출하고 사용자가 요구하는 현실감 수준에 적합한 네트워크 상황의 예측 방법을 소개한다. 또한 네트워크 지연에 의해 생성되는 비현실적인 힘 피드백을 스프링 상수의 동적인 변화를 통해서 보상하는 네트워크 지연 보상기법을 제안한다. 촉감 기반 네트워크 응용프로그램을 기반으로 제안된 촉감기반 네트워크 가상환경 구조의 안정성 및 투명성 평가의 타당성을 검증하고 네트워크 지연 보상 기법의 유용성을 확인한다.

↓

Abstract ~ In this paper, stability and transparency analysis for client/server haptic-based networked virtual environment (NVE) is introduced. From this analysis, the appropriate communication structure for the more stable and transparent haptic interactions can be derived. Also, it is possible to expect and compensate the quality deterioration of haptic interactions according to certain network conditions. In order to verify the usefulness of the analysis, simple haptic-based NVE application is implemented. For the stability verification, the vibration or strange movement of haptic interface and virtual object are measured under various network states. In addition, the usefulness of the proposed transparency analysis and network delay compensation scheme is verified by comparing distorted and compensated force feedbacks with real force feedback,

↓

핵심어: *Haptic Interaction, NVE (networked virtual environments), stability, transparency, network QoS, network adaptation, and client/server architecture.*

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원과 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다 (계약번호 UD070018AD) (IITA-2008-(C1090-0801-0017)).

*주저자 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사과정 e-mail: shlee@nm.gist.ac.kr

**교신저자 : 광주과학기술원 정보통신공학과 부교수; e-mail: jongwon@nm.gist.ac.kr

1. 서론

가상현실 기술의 발전과 네트워크의 급속한 보급으로 인해 몰입형 콘텐츠를 이용한 원격 상호 작용에 대한 관심이 증가하고 있다. 이미, 고화질 영상, 다채널 오디오, 그리고 3D CG 를 기반으로 다양한 원격 상호작용 응용프로그램들이 여러 분야에서 현실 세계의 한계를 극복하는 데에 많은 공헌을 하고 있다. 최근에는 촉감 장비의 보급으로 인해 시각과 청각뿐 만 아니라 촉감까지 제공하는 네트워크 가상 환경 (NVE: Networked Virtual Environments) 에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고 이러한 촉감 상호작용 기반의 협업 시스템은 원격 진료, 온라인 게임, 그리고 원격 공동 작업과 같은 분야에서 이미 그 유용성이 입증되었다 [1].

하지만 아직까지 최선형 방식의 인터넷상에서 현실감있는 촉감기반 네트워크 가상환경을 구현하기 위해서는 다음과 같은 문제점이 있다 [2]. 사람의 촉감은 시/청각에 비하여 외부 자극에 매우 민감하게 반응한다. 이것은 촉감 상호작용을 하는 사용자가 네트워크 상에 작은 변화 (지연/손실/대역폭) 에도 본래 느껴야 하는 촉감과 크게 다른 느낌을 받을 수 있다. [3]에서는 이를 투명성이 저하된다고 표현하고, 본래 느껴야 하는 촉감과 실제 사용자가 받는 촉감이 일치할때 투명한 촉감 시스템이라한다. 또한 입력과 출력이 동시에 이루어지는 촉감 디바이스의 특성상 촉감 디바이스는 원격지에 있는 가상환경 혹은 다른 촉감 디바이스와 closed-loop 을 형성한다. 텔레오퍼레이션 분야에서는 이미 이러한 closed-loop 시스템들이 네트워크 지연 및 손실에의해 불안정해 질 수 있음을 보였고 passivity 이론 및 wave variable 등을 사용하여 시스템을 안정화시키기 위한 노력을해왔다 [4]. 촉감기반 네트워크 가상환경도 역시 이러한 안정화 문제를 간과할 수 없고 더욱이 인터넷과같은 시간에따라 가변적인 네트워크를 사용하는 경우에는 다양한 네트워크 상황을 충분히 고려하여 시스템을 구축하여야 한다.

본 논문은 이러한 촉감기반 네트워크 가상 환경의 안정성 요구조건을 만족시키기위한 네트워크 가상 환경 시스템의 구조를 제안하고 사용자가 원하는 투명성 요구조건을 만족시키기위한 투명성 분석 방법을 제안한다. 또한 투명성 분석을 통해서 왜곡된 힘 피드백을 보상하는 네트워크 지연 보상 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 관련연구에 대해서 소개한다. 3 절에서는 제안하는 네트워크 가상환경 시스템을 설명하고 제안한 시스템의 안정성을 증명한다. 4 장에서는 제안한 시스템의 투명성을 보장하기위한 분석방법 및 네트워크 지연 보상 기법을 제안한다. 5 장에서는 실험결과를 통해서 제안한 분석방법의 유용성을 검증한다. 6 장에서는 본논문의 결론 및 추후 과제에대해서 논한다.

2. 관련연구

다음과 같은 몇몇 연구들은 촉감기반 네트워크 가상환경의 안정성과 투명성 문제를 해결하기위한 방법들을 제시하였다. [5]에서는 P2P (peer-to-peer) 방식의 촉감 기반 네트워크 가상환경 구조에서 force-force 촉감 인터랙션을 할 때 네트워크 지연이 초래하는 클라이언트들간의 불일관성 및 불안정화 문제점에 중점을 둔다. 선형 보상 기법과 Smith predictor 를 사용하여 두 클라이언트간의 가상물체 motion 을 동기화하고 안정성 분석을 통해서 허용가능한 최대 지연을 유도하였다. [6]에서도 네트워크 지연을 줄이면서 높은 일관성을 제공할 수 있는 P2P 방식의 촉감기반 네트워크 가상환경 구조를 제안하였다. 클라이언트/서버 구조가 우수한 일관성을 제공한다는 장점을 언급했지만 네트워크 지연이 증가하는 단점에 중점을 두었다. P2P 구조에서 position-position 방식의 상호작용과 force-force 방식의 상호작용을 비교하여 force-force 방식이 일관성 측면에서 더 우수함을 실험을 통해서 입증하였다. [7]에서는 촉감 가상환경의 불안정화 요소를 분석하고 이를 안정화 시킬 수 있는 energy bounding 알고리즘을 제안하였다. 또한 안정성과 투명성간에 상충관계에 대해서 지적하였다.

기존의 연구들은 촉감기반 네트워크 가상환경의 안정성 및 투명성을 증가시키는데 많은 공헌을 하였지만, 주로 P2P 기반의 촉감기반 네트워크 가상환경에 중점을 두었다. 본 논문은 클라이언트/서버 구조의 우수한 일관성과 안정성에 중점을 두고 서버가 초래하는 지연의 증가는 현재 네트워크 상황과 투명성의 관계 정립을 통해서 보완한다. 즉, 시간에 따라 가변적인 네트워크 상황에 대처하여 사용자의 현실감을 유지시켜줄 수 있는 방법론을 제공한다.

3. 안정성을 고려한 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경

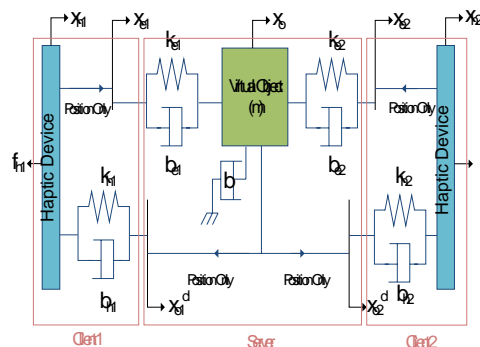


그림 1. 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경의 schematic 블럭도.

그림 1 은 제안하는 안정성을 고려한 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경의 도식적인 블럭도를

보여준다. 서버는 가상환경의 일관성을 관리하는 역할을 한다. 즉 서버는 i 개의 클라이언트들로부터 촉감 인터랙션 포인터 (HIP: haptic interaction pointer) 정보 (x_{hi}) 를 수신 (x_{ei}) 하고 물체의 질량 (m) 및 댐핑 (b) 정보를 기반으로 모든 가상물체를 업데이트 (x_o) 한다. 가상물체에 제공되는 힘 (f_{ei}) 은 가상물체와 x_{hi} 거리차로부터 스프링 댐퍼 모델 (k_{ei} , b_{ei}) 을 사용하여 계산된다. 클라이언트들은 서버로부터 x_o 를 수신 (x_o^d) 하여 로컬의 가상환경에 반영한다. 서버측에서 수행되는 일련의 계산들은 다음과 같다 (클라이언트에서 서버까지의 네트워크 지연: T_i^{out}):

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_o(t) + b\dot{x}_o(t) &= \sum_{n=1}^i f_{ei} \\ x_{ei}(t) &= x_{hi}(t - T_i^{out}), \\ f_{ei} &= -\{k_{ei}(x_o(t) - x_{ei}(t)) + b_{ei}(\dot{x}_o(t) - \dot{x}_{ei}(t))\}. \end{aligned}$$

시스템의 안정성을 위해서 클라이언트와 서버사이에는 HIP 와 가상물체의 위치 정보만을 공유하고 사용자에게 제공하는 힘 (f_{hi})은 각각의 클라이언트에서 스프링 댐퍼 모델 (k_{hi} , b_{hi}) 을 사용하여 분산적으로 계산되어진다. 클라이언트측에서 힘 피드백을 위해서 수행되는 구체적인 수식들은 다음과 같다 (서버에서 클라이언트까지의 네트워크 지연: T_i^{in}):

$$\begin{aligned} x_{oi}^d(t) &= x_o(t - T_i^{in}), \\ f_{hi} &= k_{hi}(x_{oi}^d(t) - x_{hi}(t)) + b_{hi}(\dot{x}_{oi}^d(t) - \dot{x}_{hi}(t)). \end{aligned}$$

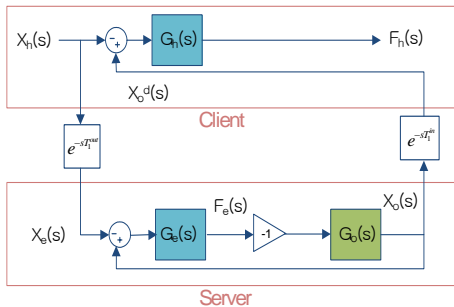


그림 2. 단순화된 촉감기반 네트워크 가상환경 구조.

제안된 시스템의 안정성을 검증하기 위해서 그림 1 을 그림 2 와 같이 단순화한다. 네트워크가 시스템의 안정성에 미치는 영향만을 고려하기 위해서 각각의 클라이언트와 서버 시스템은 안정하다고 가정한다. 각각의 클라이언트들은 같은 구조를 가지며 그 수가 안정성에는 영향을 미치지 않기 때문에 클라이언트와 서버가 각각 하나씩 존재하는 구조로 단순화된다. 가상물체 업데이트 ($G_o(s)$) 와 힘계산을 위한 전달함수 ($G_e(s)$, $G_h(s)$)도 다음과 같이 s 평면상에서 근사화된다:

$$\begin{aligned} G_h(s) &= k_h, \\ G_e(s) &= k_e, \\ G_o(s) &= \frac{1}{ms^2 + bs}. \end{aligned}$$

네트워크 지연은 지수함수 형식으로 표현되면 네트워크 라운드트립 지연은 $R = T_1^{out} + T_2^{in}$ 로 표기한다.

안정성을 평가하기 위해서 네트워크 지연은 Padé 근사화를 통해서 근사화하고¹. 사용자의 손과 가상환경에서 전달되는 임피던스값 (Z_h , Z_e) 이 사용된다²:

$$Z_e(s) = \frac{F_e(s)}{\dot{X}_e(s)} = \frac{-k_e m s - k_e b}{m s^2 + b s + k_e}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z_h(s) &= \frac{F_h(s)}{\dot{X}_h(s)} \\ &= \frac{-k_h R m s^2 - (\frac{k_h R b}{2} + k_h m) s - (k_h b + k_h k_e R)}{\frac{R m}{2} s^3 + (\frac{b R}{2} + m) s^2 + (b + \frac{R k_e}{2}) s + k_e}. \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (1) 그리고 (2)의 모든 특성함수의 근이 네트워크 지연 (R) 에 관계없이 s 평면의 좌측에 존재하기때문에 제안된 구조의 시스템은 네트워크 지연에 관계없이 안정성을 보장해 준다.

4. 촉감기반 네트워크 가상환경의 투명성 분석

네트워크의 지연에 따른 시스템의 투명성을 분석하기 위해서 지연의 증가에 따른 Z_h 와 Z_e 의 변화를 살펴본다. $Z_h=Z_e$ 가 성립할 때 이상적인 투명성을 제공한다고 가정한다 [4]. 그림 3 은 k_h , k_e , m , b 를 각각 0.5, 0.5, 0.25, 0.0025 로 놓았을때 네트워크 지연 증가에 따른 Z_h 의 변화를 보여준다. 사용자의 입력의 범위를 $10^{-6} \sim 10^3$ Hz 로 가정했을때 낮은 주파수 입력에서 네트워크 지연이 증가할 수록 더 높은 Z_h 를 얻는다. 이는 네트워크 지연으로인해서 가상 물체가 사용자의 입력에 바로 반응하지 않기 때문에 이다. 즉 사용자는 네트워크 지연이 증가함에 따라 실제 가상 물체의 특성보다 더 큰 질량과 댐핑 계수를 가진 물체로 인식하게 된다.

¹ $e^{-sT} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s}$

² 기계적인 의미의 임피던스는 $Z = F/V$ (F : 힘, V : 속도) 로서 사용자가 인지하는 힘의 역학관계를 표현한다 [8].

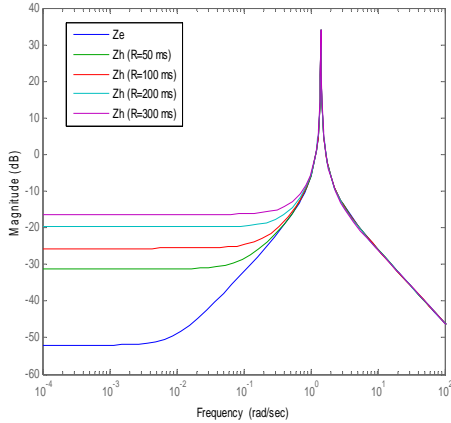


그림 3. 지연에 따른 Z_h 의 변화.

4.1 가상물체의 질량 및 댐핑 왜곡

네트워크 지연에 따른 사용자가 느끼는 힘의 크기의 증가를 정량화하기 위해서 사용자가 인지하는 가상 물체의 질량 (m_h) 및 댐핑 (b_h) 을 계산한다. 관심 주파수 영역이 저주파 대역이므로 다음과 같이 Eq. (2) 를 근사화하면 (Z_h^{app}) m_h 와 b_h 의 근사값을 유도할 수 있다:

$$Z_h^{app}(s) = \frac{-(\frac{k_h R b}{2} + k_h m)s - (k_h b + k_h k_e R)}{(\frac{b R}{2} + m)s^2 + (b + \frac{R k_e}{2})s + k_e} \approx \frac{-k_h m_h s - k_h b_h}{m_h s^2 + b_h s + k_e} \quad (3)$$

$$m_h = m + \frac{Rb}{2} \quad (4)$$

$$b_h = b + k_e R \quad (5)$$

따라서, 지연이 증가함에 따라 사용자가 인지하는 질량과 댐핑계수는 각각 서버측에 설정된 질량과 댐핑계수보다 $Rb/2$, $k_e R$ 만큼 더 크다는 것을 알 수 있다.

시스템이 허용가능한 가상 물체의 질량 및 댐핑 값 ($m_{allowable}$, $b_{allowable}$) 과 변화률 (c_m , c_b) 이 다음과 같이 정의된다면 Eq. (4) 과 (5) 를 사용하여 시스템이 최대 허용가능한 네트워크 지연을 유도할 수 있다:

$$c_m = \frac{m_{allowable} - m}{m}$$

$$c_b = \frac{b_{allowable} - b}{b}$$

질량을 기준으로 유도된 최대 네트워크 지연을 R_{max}^m , 댐핑을 기준으로 유도된 최대 네트워크 지연을 R_{max}^b 라 하면 각각은 다음과 같이 예측될 수 있다:

$$R_{max}^m = \frac{2c_m m}{b}$$

$$R_{max}^b = \frac{c_b b}{k_e}$$

4.2 가상물체의 스프링 계수 왜곡

사용자가 느끼는 힘의 왜곡은 클라이언트측의 스프링 계수의 왜곡으로도 해석될 수 있다. 가상물체의 왜곡된 질량과 댐핑을 각각 스프링 계수와 맵핑시키기 위해서 두개의 왜곡된 스프링 계수 k_h^m , k_h^b 를 정의한다. Eq. (3) 에서 가상 물체의 질량 및 댐핑 계수가 왜곡되지 않는다고 가정하면 k_h 대신에 k_h^m , k_h^b 를 사용하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다:

$$k_h^m m = k_h (m + \frac{Rb}{2})$$

$$k_h^b b = k_h (b + k_e R)$$

최종적으로 사용자가 인지하는 왜곡된 스프링 계수값을 다음과 같이 근사화할 수 있다:

$$k_h^m = k_h + \frac{k_h R b}{2m}$$

$$k_h^b = k_h + \frac{k_e R}{b}$$

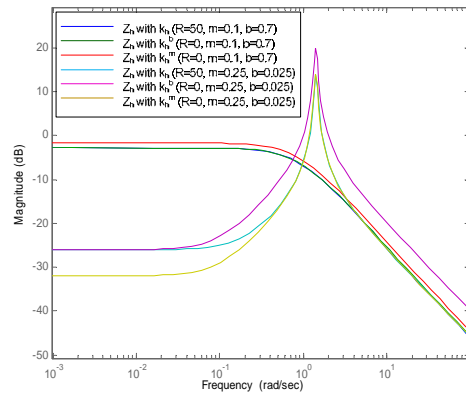


그림 4. k_h^m 와 k_h^b 의 정확도 비교.

결론적으로 클라이언트측의 사용자는 네트워크 지연이 증가함에 따라 본래 설정되어있는 스프링 상수 보다 $k_h R b / 2m$ 혹은 $k_h k_e R / b$ 만큼 더 큰 스프링 상수를 사용한 것과 같은 힘을 받는다. 만약 $b/2m = k_e/b$ 라면 즉 $b = \sqrt{2mk_e}$ 이라면 $k_h^m = k_h^b$ 가 성립한다. 하지만 b 가 $\sqrt{2mk_e}$ 보다 작은 경우에는 k_h^m 이 큰 경우에는 k_h^b 가 더욱 네트워크로 인해 왜곡된 힘의 크기를 잘 반영함을 알 수 있다 (그림 4 참조). 그림 4 는 m 값이 작고 b 값이 클 경우 k_h^m 를 사용하여 힘을 계산하면 실제 인지되는 힘의 크기 보다 더 큰 힘을 생성하는 것을 알 수 있다.

반대로 반대로 m 값이 크고 b 값이 작을 경우 k_h^b 가 실제 인지되는 스프링 계수 보다 더 큰 값을 갖게된다.

4.3 네트워크 지연 보상 기법

네트워크 지연에 따라서 사용자가 느끼는 힘이 달라지는 것을 보완하기 위해 클라이언트 측의 스프링 계수를 변화 (k_h^{new}) 시켜줄 수 있다. 사용자가 인지하는 스프링 계수 증가분 ($k_{increased}$) 을 본래의 스프링 상수 k_h 에서 빼주면 네트워크 지연으로 힘이 왜곡되는 것을 감소 시킬 수 있다. 그림 5 는 제안된 네트워크 지연 보상 기법의 pseudo code 를 보여준다.

```

if  $b \geq \sqrt{2mk_e}$ 
then  $k_{increased} = \frac{k_h k_e R}{b}$ 
else  $k_{increased} = \frac{k_h R b}{2m}$ 
end
if  $R > R_{max}^m$  or  $R > R_{max}^b$ 
then  $k_h^{new} = k_h - k_{increased}$ 
else  $k_h^{new} = k_h$ 
end
    
```

그림 5. 네트워크 지연 보상 기법의 pseudo code.

5. 실험 결과



그림 6. 촉감 협업 응용프로그램.

그림 6 과 같은 촉감 기반 네트워크 응용프로그램을 기반으로 안정성 및 투명성 평가를 검증한다. 네트워크 애플레이터를 사용하여 다양한 네트워크 상황을 연출하고 시스템의 진동 및 비정상적인 힘을 관측한다.

그림 7 은 제안된 촉감기반 네트워크 가상환경 시스템 구조의 안정성과 네트워크 지연에 따른 힘 피드백의 증가를 보여준다. $m=0.5$, $b=0.1$, $k_h=0.5$ 로 놓아올때 그림 7 과 같이 네트워크 지연이 증가함에 따라서 사용자가 인지하는 힘 피드백의 크기가 증가한다. 하지만 네트워크 지연이 300 ms 까지 증가를 하여도 특정한 힘으로 수렴하는 것을 볼 수 있고 이는 제안된 시스템이 안정성을 보장함을 뜻한다.

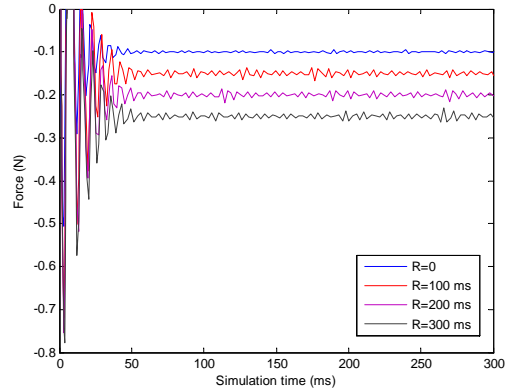


그림 7. 네트워크 지연에 따른 힘 피드백.

제안된 투명성 분석의 타당함을 보이기 위해서 네트워크 지연이 존재했을때의 힘 피드백과 네트워크 지연이 존재하지 않는다고 가정하고 가상 물체의 질량, 댐핑, 및 스프링 상수를 m_h , b_h , k_h^m 로 셋팅을 했을때의 힘 피드백을 비교하였다. 그림 8 은 네트워크 지연이 300 ms 이고 $m=0.5$, $b=0.1$, $k_h=0.5$ 일때 힘 피드백은 약 2.5N 으로 수렴함을 보여준다. 네트워크 지연이 0 인 상황에서 $m=m_h$, $b=b_h$, $k_h=0.5$ 로 설정했을 때와 $m=0.5$, $b=0.1$, $k_h = k_h^m$ 로 설정했을 때 역시 비슷한 힘 피드백으로 수렴함을 확인할 수 있고 이는 제안된 투명성 근사화의 타당함을 뜻한다.

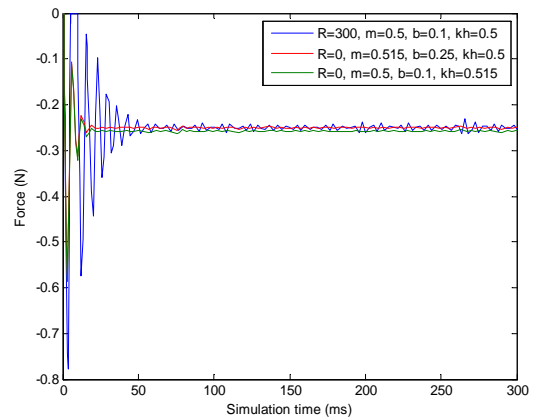


그림 8. 투명성 분석 검증.

그림 9 는 제안된 네트워크 지연 보상 기법의 유용성을 검증한다. $m=0.1$, $b=0.7$, $k_h=0.5$ 일때 네트워크 지연이 없다면 약 6.5N의 힘 피드백을 생성한다. 하지만 네트워크

지연이 300 ms 일때는 힘 피드백이 약 8.5N 까지 증가함을 알 수 있다. 제안된 네트워크 지연 보상 기법으로 k_b 를 0.3928 로 변경했을 때는 힘 피드백이 약 7N 으로써 지연이 존재하지 않은 경우와 보다 유사해 짐을 알 수 있다.

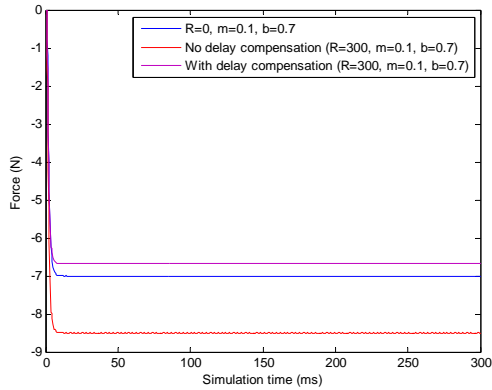


그림 9. 네트워크 지연 보상 기법의 효과.

6. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경 시스템의 안정성과 투명성 분석을 통하여, 올바른 통신 구조 및 네트워크 상황과 현실감과의 관계를 살펴보았다. 그리고 촉감 기반 네트워크 응용프로그램을 기반으로 제안된 분석을 평가 검증하였다. 추후 과제로 보다 다양한 사용자 입력을 테스트 하여 투명성 분석 및 네트워크 지연 보상 기법의 정확도를 향상시켜야 하겠다.

참고문헌

- [1] M. O. Alhalabi, S. Horiguchi, and S. Kunifuji, "An experimental study on the effects of network delay in cooperative shared haptic virtual environment," *Computers and Graphics*, vol. 27, pp. 205–213, 2003.
- [2] T. Hudson, M. C. Weigle, K. Jeffay, and R.M. Taylor II, "Experiments in best-effort multimedia networking for a distributed virtual environment," in *Proc. SPIE Multimedia Computing and Networking*, vol. 4312, pp. 88–98, 2001.
- [3] D.A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 624–637, 1993.
- [4] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 152–162, 1991.
- [5] J. Cheong, S. Niculescu, A. Annaswamyand, and M. Srinivasan, "Motion synchronization in virtual environments with shared haptics and large time delays," in *Proc. IEEE WHC*, pages 277–282, 2005.
- [6] G. Sankaranarayanan and B. Hannaford, "Virtual coupling schemes for position coherency in networked haptic environments," in *Proc. IEEE/RAS-EMBS BioRob*, pages 853–858, 2006.
- [7] Jongphil Kim and Jeha Ryu, "Stable haptic interaction control using energy bounding algorithm," *IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 351–357, 2004.
- [8] S. Hirche. "Haptic telepresence in packet switched communication networks." Ph.D thesis, 2005.